

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی ریزساختار و خواص استحکامی آلیاژ ریختگی آلومینیوم سری ۵۰۰ اصلاح شده با عنصر نادر خاکی اربیوم*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور[۱]

DOI: 10.22067/jmme.2023.81595.1106

چکیده *در این تحقیق اثر افزودن Er بر خواص کششی و ریزساختار آلیاژ ریختگی Al-3Mg-2.5Cu مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با افزودن یک درصد وزنی Er به آلیاژ ریختگی، می‌توان دانه‌ها را ریز کرده و به ساختار یکنواخت رسید. ریزساختارها و سطوح شکست نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ریختگی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند. در ضمن، افزودن Er ساختار یوتکتیک را اصلاح کرده و از یک ساختار نوک تیز و صفحه مانند درشت به یک ساختار فیبری و شاخه‌ای ریز تبدیل کرد. خواص کششی با افزودن Er تقویت شده و استحکام کششی نهایی 310 Mpa با افزودن یک درصد وزنی Er حاصل گردید. همچنین، مطالعات شکست‌نگاری نشان داد که حفره‌های ریزشده و دندریت‌ها از حالت کشیده و درشت به ساختار کروی تبدیل شده‌اند که دلیل اصلی استحکام کششی نهایی بالا بوده است. با افزودن ۱ درصد وزنی Er ، ۳۸ درصد بهبود خواص استحکامی نسبت به آلیاژ پایه به دست آمد.*

واژه‌های کلیدی عناصر نادر خاکی، خواص مکانیکی، ریزساختار.

Investigating the Microstructure and Strength Properties of 500 Series Aluminum Casting Alloy Modified with Rare Earth Element Erbium

Mohammad Alipour

Abstract *The effects of rare earth Er additions on the microstructure and tensile properties of cast Al–3Mg–2.5Cu aluminum alloy have been investigated. The results show that by adding 1 wt.% Er grain refiner in the aluminum cast alloy, the grains can be refined to a fine degree. The microstructures and fracture surfaces of cast aluminum alloy samples were examined by scaning electron microscopy (SEM). In addition, the rare earth Er modified the eutectic structure from a coarse plate-like and acicular structure to a fine branched and fibrous one. The tensile properties were improved by the addition of rare earth Er, and good ultimate tensile strength (310 MPa) was obtained when the rare earth Er addition was 1 wt.%. Furthermore, fractographic examinations revealed that refined pore and spheroidized α-Al dendrite were responsible for the high ultimate tensile strength. Adding of 1 wt.% rare earth Er make about 38% enhancement in tensile strength compared to that of unreinforced aluminum alloy.*

Keywords Rare earth materials, Mechanical Properties, Microstructure.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱۲/۲۲و تاریخ پذیرش آن۱۴۰۲/۳/۲۹ می‌باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

مقدمه

تلاشهای مستمری در جهت طراحی آلیاژهای جدید و تقویت خواص آلیاژهای موجود به منظور برآورده ساختن نیاز به ریخته گری آلومینیوم با خواص مکانیکی ارتقایافته صورت گرفته است. در طراحی آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا، برخی از مهمترین عوامل و جنبه‌هایی که باید در نظر گرفته شوند، ترکیب شیمیایی و پارامترهای تولید و اثرات حاصل شده ریزساختار بر خواص مکانیکی هستند. آلیاژهای ریخته‌گری آلومینیوم باید مبتنی بر طراحی ترکیب شیمیایی مناسب، و سپس عملیات حرارتی مناسب برای ساخت خواص طراحی شده باشند. آلیاژهای ریخته‌گری آلومینیوم مبتنی بر سیستم Al-Zn-Mg-Cu در برابر پیرسازی واکنش مطلوبی داشته و دارای استحکام ویژه بالا هستند [1]. آلیاژهای آلومینیوم مستحکم به دلیل خواص جامع جذابشان، نظیر چگالی کم، استحکام بالا، شکل‌پذیری، سفتی و مقاومت در برابر خستگی، به طور گسترده در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار گرفته‌اند [2-5].

ریزکردن دانههای آلیاژهای آلومینیوم را می توان با تلقیح ذوب با آمیزان‌های آلومینیوم حاوی Ti و یا B به خوبی انجام داد. مزایای بسیاری در استفاده از آمیزان‌ها وجود دارد. به عنوان مثال، خواص مکانیکی را می‌توان تقویت کرد [5]. استفاده از غلظتهای بالای عناصر آلیاژی به ناهمگنی در ریزساختار و جدایش شدید فازهای ثانویه منجر می‌شود. در محصولات ریخته‌گری، به دلیل تنوع اندازه ذره، مقدار فازهای یوتکتیک و مقدار رسوبات، خواص مکانیکی از محلی به محل دیگر تغییر می‌کند. لذا توجه ویژه‌ای به کاهش جدایش عناصر آلیاژی حین بازه انجماد آلیاژهای Al معطوف شده است [6-12].

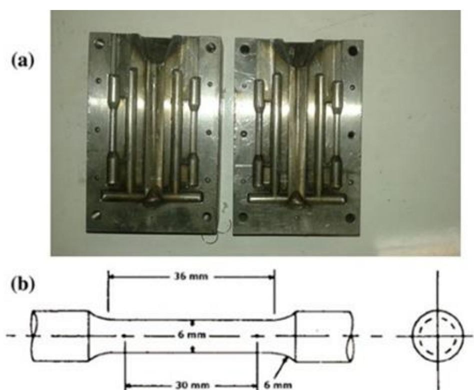
در دهه‌های اخیر، استفاده از عناصر نادر خاکی، به ویژه La، Ce، Nd، Y، Sc در آلیاژهای آلومینیوم به طور گسترده مطالعه شده است [13-16]. این مطالعات نشان می دهد که ریز ساختار این آلیاژهای اصلاح شده، خواص مکانیکی و سایر ویژگیها نظیر رسانندگی الکتریکی، کیفیت اپتیکی و مقاومت در برابر خوردگی بهتری نسبت به آلیاژ اصلاح نشده نشان می‌دهند. اثرات عناصر واسطه و نادر خاکی در آلیاژهای آلومینیوم مربوط به ساختارهای الکترونی خاص آنها می‌باشد که توجه ویژه‌ای را به خود جلب نموده است. اثرات عناصر نادر خاکی در آلیاژهای آلومینیوم با ماهیت آنها تعیین می‌شود. به دلیل شعاع اتمی بزرگ و تمایل آنها به از دست دادن دو الکترون مدار s، و یک الکترون 5d یا 4f و تبدیل شدن به یون سه ظرفیتی، فلزات نادر خاکی در واکنش‌های شیمیایی بسیار فعال هستند [17,18].

هدف اصلی این پژوهش، مطالعه اثر افزودن عنصر نادر خاکی Er بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu می‌باشد. قبلا در هیچ تحقیق علمی بر روی این سری از آلیاژ که به صورت ریختگی مورد استفاده قرار گرفته است، کار نشده است. در ضمن هدف از این پژوهش بهبود خواص این سری از آلیاژها بدون انجام کار مکانیکی و صرفا با افزودن عناصر نادر خاکی به آنها می‌باشد.

روش تحقیق

آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu به عنوان آلیاژ پایه مورد استفاده قرار گرفت. مراحل ذوب آلیاژ در یک کوره مقاومت الکتریکی با استفاده از یک بوته کاربید سیلسیم انجام شد. عناصر خالص صنعتی، Mg و Cu به عنوان مواد اولیه برای تهیه آلیاژ پایه به کار گرفته شدند. نمونه‌های آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu به قطعات کوچک مختلفی بریده شده و سپس در یک بوته گرافیتی قرار داده شد. بوته گرافیتی در یک کوره مقاومت الکتریکی قرار داده شد. ذوب آلیاژ آلومینیوم با حرارت‌دهی تا دمای ~750 °C صورت گرفت. Er با استفاده از آمیزان Al-30Er در درصدهای مختلف ۰,۵، ۱، ۱,۵ و ۲ درصد وزنی به آلیاژ مذاب در دمای ۷۵۰ °C افزوده شد.

پس از افزودن موفقیت‌آمیز Er، مذاب داخل یک قالب دائمی که طبق استاندارد ASTM B557M-10 طراحی و ساخته شده است، ریخته شد (شکل ۱). مزیت استفاده از قالب دائمی، سیستم پرشدگی رو به بالا و طراحی تغذیه (پرشدگی) است. در این طراحی، مذاب تلاطم کمی دارد که به کاهش به دام افتادگی هوا و تخلخل در نمونه‌های ریختگی نهایی می‌انجامد.



شکل ۱ (الف) قالب ریخته‌گری، (ب) ابعاد نمونه تست کشش

برای مطالعات ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی روبشی– SEM (ساخت Cam Scan MV2300) مجهز به آنالیز پراش انرژی پرتو X (EDX) مورد استفاده قرار گرفت. بخش‌های برش خورده آلیاژ با استفاده از کاغذ سمباده، سمباده زنی و در ادامه پولیش شده و سپس با عامل کلر (۲ ml HF، ml HCl۳ ، ۵ ml HNO3 و ۱۹۰ H2O) اچ شدند تا ساختار مورد نظر حاصل گردد. میانگین اندازه دانه نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM: E112 اندازه‌گیری شد. تعیین فاز با روش پراش پرتو X (ساخت Philips PW 1830) صورت گرفت. آزمایش کششی روی تمام نمونه‌ها در دمای اتاق با دستگاه SANTAM با نرخ کرنش 1 mm/min انجام شد. چهار نمونه برای هر یک از درصدها تهیه و مورد آزمون قرار گرفت و مقدار میانگین در مقاله گزارش شد.

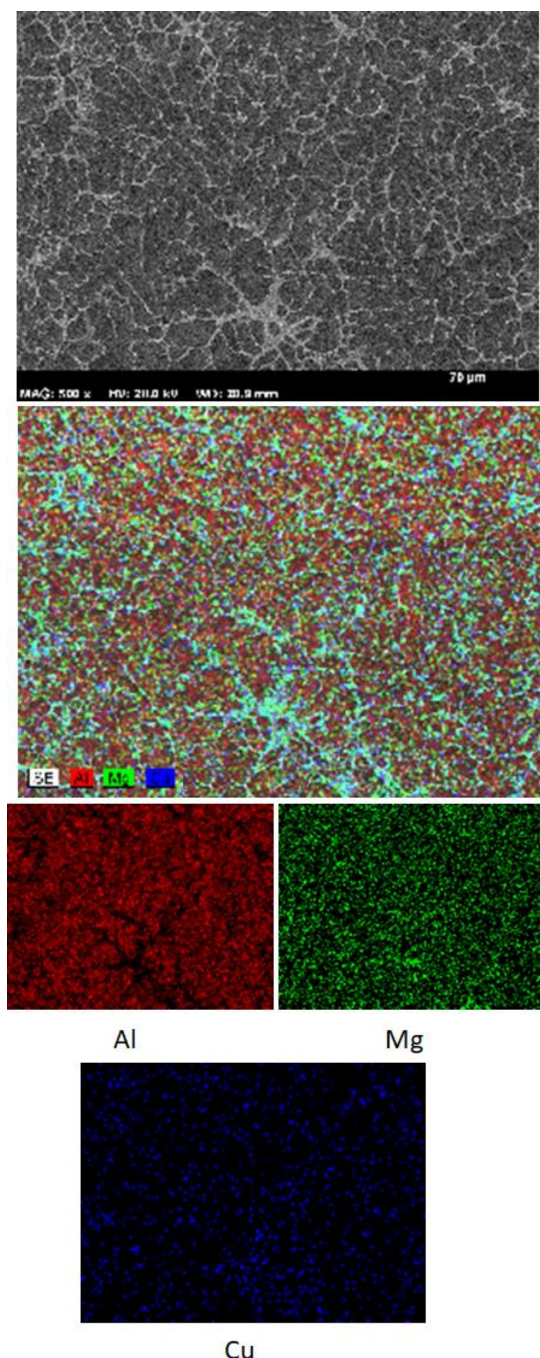
نتایج و بحث

مطالعات ریزساختاری

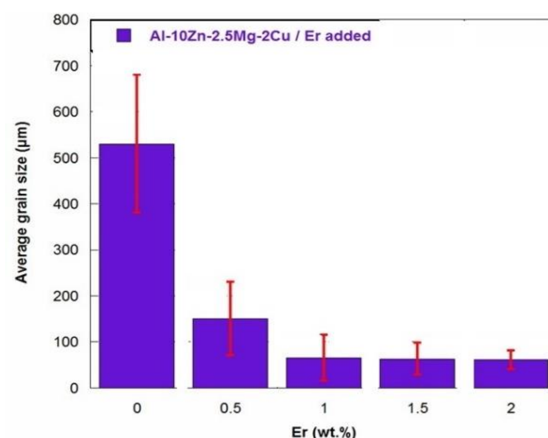
شکل (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیز عنصری آلیاژ پایه Al-3Mg-2.5Cu را نشـــان می‌دهد. جدایش عناصـــر آلیاژی حین انجماد آلیاژ اتفاق می‌افتد و باعث به وجود آمدن غلظت بالای Cu و Mg در نواحی بین دندریتی می‌شود.

جدایشی که حین ریخته‌گری رخ داده است، به غلظت بالایی از Cu و Mg در نواحی یوتکتیک بین دندریتی منجر می‌شود. مشخص است که نرخ نفوذ Cu از Mg کندتر است که حین انجماد به غلظت بالای Cu در نواحی ساختارهای یوتکتیک می‌انجامد [8].

شکل (۳) اثر مقادیر مختلف Al-30Er را بر اندازه دانه در آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu نشان می‌دهد. مشخص شد که میانگین اندازه دانه آلیاژ پایه Al-3Mg-2.5Cu در حدود ۵۵۰ μm بوده است. افزودن Er به آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu، دانه‌های α-Al اولیه ستونی و درشت را ریز کرده و به دانه‌های α-Al هم‌محور ریز با میانگین اندازه ۶۲ μm تبدیل کرده است. دلیل اصلی این است که ذرات Al_3Er به عنوان عامل‌های هسته‌زایی (جوانه‌زنی) حین انجماد دانه‌های α-Al عمل می‌کنند. به وضوح مشاهده می‌شود که ریزساختار آمیژان Al-30Er متشکل از زمینه a-Al و فاز بین فلزی Al_3Er است. فاز Al_3Er به طور یکنواخت در زمینه Alα- توزیع شده است. مکانیسم‌های متعددی برای فرایند ریزدانه شدن پیشنهاد شده است. در برخی از مکانیسم‌ها گفته شده است که وجود ذراتی نظیر Al_3Er، در مراحل ریزشدن دانه مؤثر است. وجود برخی عناصر آلیاژی، به ویژه Mg و Cu بازده آمیژان‌هایی نظیر Al--30Er را بهبود می‌بخشد. با افزایش مقدار درصد وزنی Er، این ذرات مرزدانه‌ها را تثبیت کرده، ریزشدن دانه را افزایش داده و به افزایش استحکام منجر می شوند. وقتی درصد وزنی Er بیش از wt٪ ۱ است، اندازه دانه ثابت خواهد بود و اثر ریزشدن دانه حذف می‌شود.



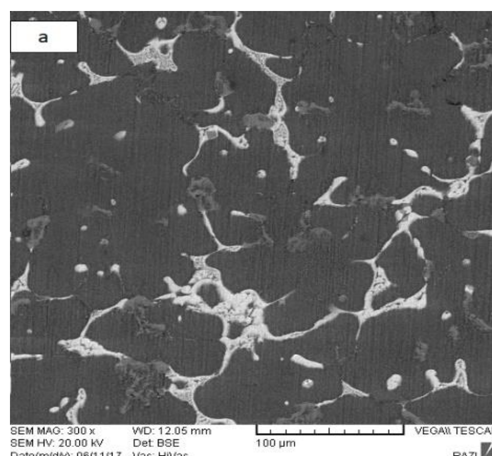
شکل ۲ نتایج آنالیز عنصری نمونه اصلاح نشده

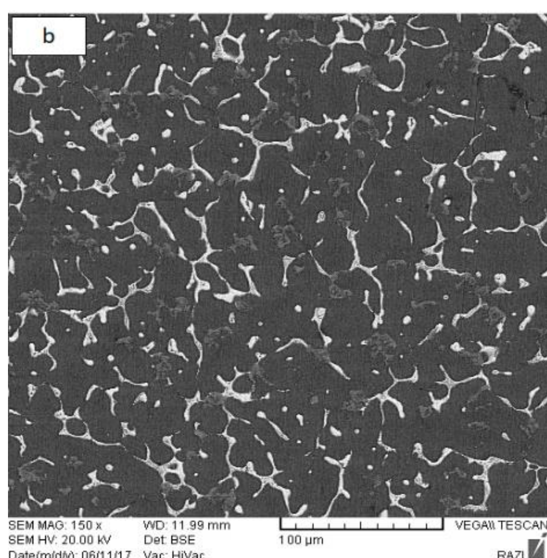


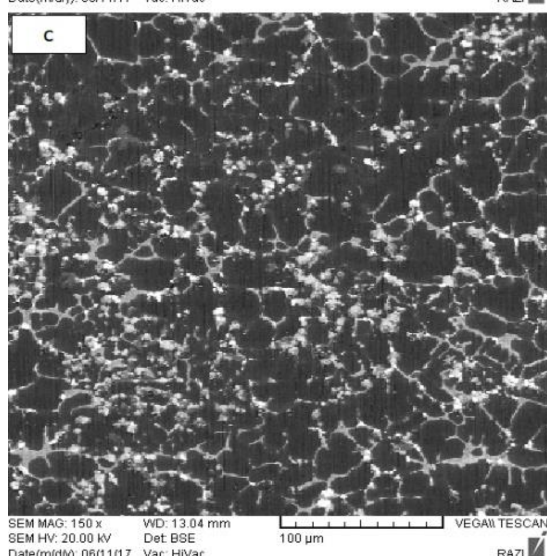
شکل ۳ اندازه دانه بر حسب میزان عنصر نادر خاکی Er

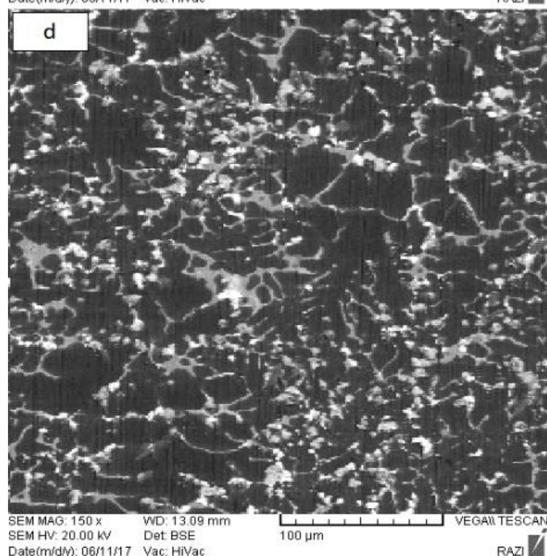
شکل (۴) تصاویر ریزساختار آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu قبل و بعد از اضافه کردن Er را با درصدهای وزنی مختلف نشان می‌دهد. تصاویر به وضوح نشان می‌دهند که پس از افزودن Er تغییر قابل توجهی در مورفولوژی دندریتی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu رخ می‌دهد. ریزساختارهای آلیاژ اصلاح شده، ریزساختار گلبولی از محلول جامد دانه‌های α-Al اولیه را نشان می‌دهد که با فازهای ثانویه بین دندریتی احاطه شده‌اند. در مقایسه با نمونه‌های دارای Er، نمونه‌های اصلاح نشده مورفولوژی درشتری دارند. طبق شکل (۴) ملاحظه می‌شود که افزودن Er مقدار مرزدانه‌ها را افزایش داده و بالطبع توزیع همگن‌تر رسوبات بین فلزی را بهبود می‌بخشد.

شکل (۵) تصویر میکروسکوپ روبشی و آنالیز عنصری آلیاژ ریختگی Al-3Mg-2.5Cu اصلاح شده با یک درصد وزنی Er را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که آنالیز EDS انجام شده روی این آلیاژ وجود فازهای بین فلزی Al_3Er را نشان می‌دهد که بیانگر بالاتر بودن مقدار Al و Er از سطح میانگین ترکیب شیمیایی در آلیاژ پایه هست.

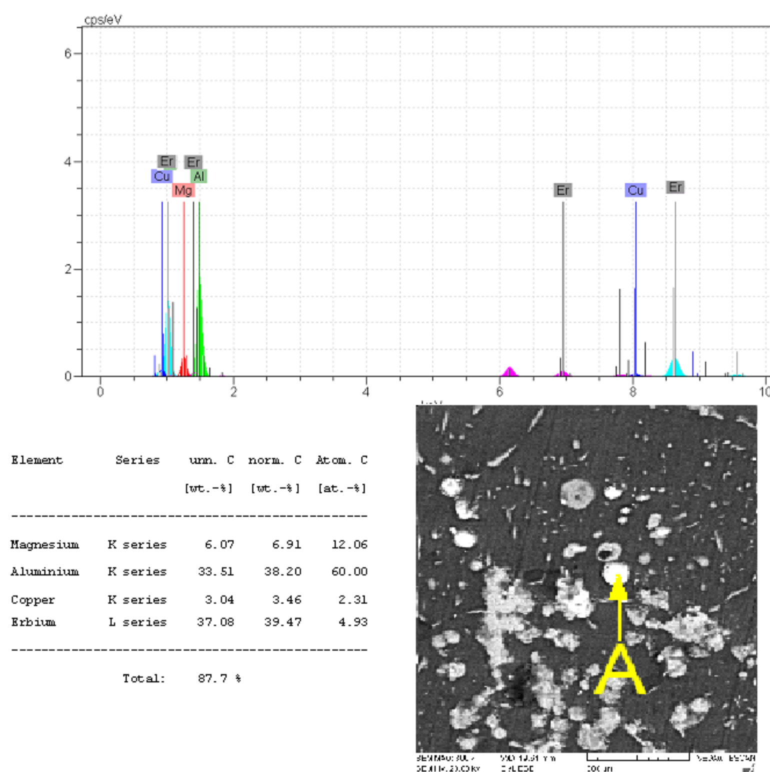








شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار آلیاژ پایه با: (الف) صفر درصد Er، (ب) 0.5 درصد Er ، (ج) 1 درصد Er و (د) 2 درصد Er



Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Magnesium	K series	6.07	6.91	12.06
Aluminium	K series	33.51	38.20	60.00
Copper	K series	3.04	3.46	2.31
Erbium	L series	37.08	39.47	4.93
	Total:	87.7 %		

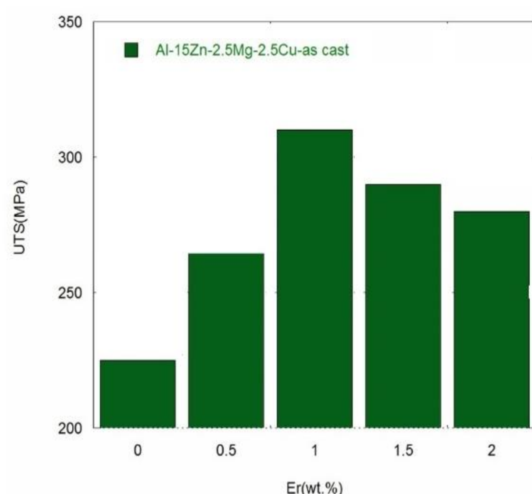
شکل ۵ آنالیز عنصری اشعه ایکس آلیاژ آلومینیوم Al-3Mg-2.5Cu /1%

استحکام کششی

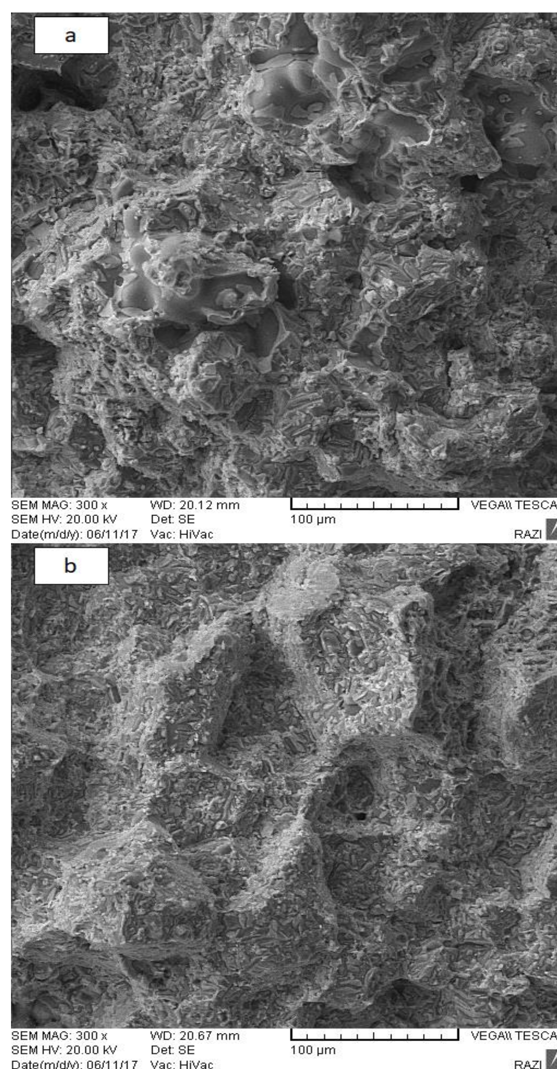
شکل (۶) استحکام کششی نهایی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu را تحت شرایط مختلف نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، میانگین استحکام کششی نهایی (UTS) نمونه‌ها پس از افزودن Er، از ۸±۲۲۵ تا حدود ۳۱۰ MPa افزایش می‌یابد. خواص مکانیکی (کششی) آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu -xEr عمدتا به شکل، اندازه و توزیع اندازه دانه‌های α-Al، ساختار یوتکتیک و توزیع فازهای بین فلزی در میان دندریت یا دانه‌ها بستگی دارد [19]. دلیل اصلی این بهبود، احتمالا ناشی از اندازه کوچکتر دانه‌های ماده ریخته‌گری است که به توزیع یکنواختتر و ریزتری از فازهای ثانویه (بین فلزی‌ها) در آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu -xEr منجر می‌شود. مشخص است که طبق نظریه هال-پچ، هرچه دانه‌ها ریزتر باشند، استحکام بالاتر خواهد بود [20,21].

استحکام نهایی نمونه‌های اولیه مقدار کمی دارد که دلیل آن وجود تخلخل‌های انقباضی داخل دانه‌ها و مرزهاست. از طرف دیگر، آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu را می‌توان با ترسیب ذرات Al_3Er پس از افزودن آمیژان Al-30 wt% Er استحکام بخشید. ذرات میکرو Al_3Er، نقش مهمی در مکانیزم استحکام-بخشی دارند.

با افزودن بیشتر از حد بهینه اربیوم به ساختار با اینکه اندازه دانه ثابت می‌ماند اما باعث ایجاد ر سوبات در شت در ساختار شــده و این مراکز در حین بارگذاری و آزمون کشــش به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل کرده و باعث جوانه‌زنی ترک و در ادامه شکست قطعه خواهند شد. بنابراین در درصدهای بالای اربیوم خواص مکانیکی کاهش پیدا خواهد کرد.



شکل ۶ استحکام کشش نهایی آلیاژ پایه و نمونه‌های اصلاح شده با Er تحت شرایط مختلف



شکل ۷ شکست‌نگاری نمونه‌های کشش برای آلیاژ های: (الف) آلیاژ پایه، (ب) آلیاژ اصلاح شده با یک درصد وزنی Er

مطالعات سطوح شکست

شکل (۷) سطوح شکست آلیاژهای ریخته‌گری را تحت شرایط مختلف نشان می‌دهد. طبق شکل (۷) به وضوح مشاهده می‌شود که صفحات کلیواژ نامنظم گسترده و برخی رگه‌های بریدگی روی سطح شکست آلیاژ پایه ظاهر می‌شود. این پدیده نشان دهنده کم بودن استحکام نهایی آلیاژ پایه نسبت به آلیاژهای اصلاح شده با Er می‌باشد (شکل ۶). افزودن Er باعث اصلاح فازهای ثانویه شده و این مهم باعث کاهش صفحات کلیواژ شده و تعداد گودی‌ها افزایش می‌یابد و عمق آنها کمتر می‌شود (شکل ۷b). در کل بهترین حالت برای نمونه‌های اصلاح شده با یک درصد وزنی Er به وجود آمد که بیشترین استحکام را دارا می‌باشند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آلومینیوم Al-3Mg-2.5Cu اصلاح شده با درصدهای مختلف آمیزان Er (۰،۵، ۱، ۱،۵ و ۲ درصد وزنی)، به روش ریخته‌گری ساخته شده و ریزساختار و خواص کششی آنها بررسی شد. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد.

۱. خواص کششی آلیاژهای ریختگی Al-3Mg-2.5Cu ، عمدتا به شکل، نوع و اندازه دانه α-Al و توزیع فازهای ثانویه بستگی دارد.
۲. آمیزان Al-30Er تأثیر به‌سزایی در کاهش اندازه دانه، تغییر مورفولوژی دندریتی و ایجاد ریزساختار ریز و یکنواخت دارد.
۳. بهینه‌ترین درصد برای آمیزان Al-30Er، یک درصد وزنی می‌باشد که در آن بیشترین استحکام حاصل می‌شود.
۴. استحکام کششی نهایی آلیاژهای ریختگی، با افزودن Er به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این عمدتا به دلیل توزیع یکنواختتر و ریزتر فاز ثانویه و دانه‌ها و همچنین توزیع فازهای بین فلزی Al_3Er در داخل زمینه می‌باشد.
۵. میانگین استحکام کششی نهایی (UTS) نمونه‌ها پس از افزودن Er، از ۸±۲۲۵ تا حدود ۳۱۰ MPa افزایش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] J. Hirsch, Aluminium in innovative light-weight car design, *Mater. Trans.* Vol. 52, pp. 818-824, (2011).

[2] T. Dursun, C. Soutis, Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys, *Mater. Des.* Vol. 56, pp. 862-871, (2014).

[3] A. Haghparast, M. Nourimotlagh, M. Alipour, Effect of the strain-induced melt activation (SIMA) process on the tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy modified by Al-5Ti-1B grain refiner, *Mater.*

Charac. Vol. 71, pp. 6-18, (2012).

[4] M. Alipour, M. Emamy, Effects of Al–5Ti–1B on the structure and hardness of a super high strength aluminum alloy produced by strain-induced melt activation process, *Mater. Des*. Vol. 32, pp. 4485-4492, (2011).

[5] M. Alipour, M. Emamy, R. E. Farsani, M. H. Siadati, H. Khorsand, Effects of a modified SIMA process on the structure, hardness and mechanical properties of Al-12Zn-3Mg-2.5Cu alloy, *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*. Vol. 12, pp. 77-88, (2015).

[6] M. Alipour, B.G. Aghdam, H.E. Rahnoma, M. Emamy, Investigation of the effect of Al–5Ti–1B grain refiner on dry sliding wear behavior of an Al–Zn–Mg–Cu alloy formed by strain-induced melt activation process, *Mater. Des*. Vol. 46, pp. 766-775, (2013).

[7] M. Alipour, M. Emamy, S.H.S. Ebrahimi, M. Azarbarmas, M. Karamouz, J. Rassizadehghani, Effects of pre-deformation and heat treatment conditions in the SIMA process on properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy modified by Al-8B grain refiner, *Materials Science and Engineering A*. Vol. 528, pp. 4482-4490, (2011).

[8] M. Alipour, M. Emamy, M. Azarbarmas, M. karamouz, Effects of Al-5Ti-1B master alloy on the microstructural evaluation of a highly alloyed aluminum alloy produced by SIMA process, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1252, pp. 1060-1072, (2010).

[9] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Karamouz, M. Azarbarmas, Effects of Al-8B grain refiner on the structure, hardness and tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy, *TMS Annual Meeting*, Vol. 2, pp. 309-320, (2011).

[10]G.S. Pradeep Kumar, P.G. Koppad, R. Keshavamurthy, M. Alipour, Microstructure and mechanical behaviour of in situ fabricated AA6061–TiC metal matrix composites, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 17, pp. 535-544, (2017).

[11] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Karamouz, M. Azarbarmas, Effects of Al-5Ti-1B grain refiner on the structure, hardness and tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy, *TMS Annual Meeting*, Vol. 3, pp. 833-842, (2011).

[12] M. Alipour, M. Azarbarmas, F. Heydari, M. Hoghoughi, M. Alidoost, M. Emamy, The effect of Al-8B grain refiner and heat treatment conditions on the microstructure, mechanical properties and dry sliding wear behavior of an Al-12Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy” *Materials and Design*, Vol. 38, pp. 64-73, (2012).

[13] S.S. Mirjavadi, M. Alipour, A.M.S. Hamouda, M.K. Besharati Givi, M. Emamy,” Investigation of the effect of Al-8B master alloy and strain-induced melt activation process on dry sliding wear behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy” *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 308-316, (2014).

[14] B.M. Afshari, , S.S. Mirjavadi, Y.A. Dolatabad, M. Aghajani, M.K.B. Givi, M. Alipour, M. Emamy, "Effects of pre-deformation on microstructure and tensile properties of Al—Zn—Mg—Cu alloy produced by modified strain induced melt activation", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, Vol. 26, pp. 2283-2295, (2016).

[15] M. Alipour, S.S. Mirjavadi, M.K. Besharati Givi, H. Razmi, M. Emamy, J. Rassizadehghani, "Effects of Al-5Ti-1B master alloy and heat treatment on the microstructure and dry sliding wear behavior of an Al-12Zn-3Mg-2.5Cu alloy", *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 9, pp. 8-16, (2012).

[16] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Azarbarmas, M. Karamouz, "Effect of predeformation and heat treatment

conditions in the modified SIMA process on microstructural of a new developed super high-strength aluminum alloy modified by A1-8B grain refiner", *TMS Annual Meeting*, Vol. 3, pp. 843-853, (2011).

[17] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Karamouz, M. Azarbarmas, "Effects of Al-8B grain refiner on the structure, hardness and tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy", *TMS Annual Meeting*, Vol. 2, pp. 309-320, (2011).

[18] B. Binesh, M. Aghaie-Khafri, RUE-based semi-solid processing: Microstructure evolution and effective parameters, *Materials & Design*, Vol. 95, pp. 268-286, (2016).

[19] B. Binesh, M. Aghaie-Khafri, "Microstructure and texture characterization of 7075 Al alloy during the SIMA process", *Materials Characterization*, Vol. 106, pp. 390-403, (2015).

[20] J. Buha, R.N. Lumley, A.G. Crosky, "Secondary ageing in an aluminium alloy 7050", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 492, p. 1, (2008).

[21] C. Mondal, A.K. Mukhopadhyay, T. Raghu, V.K. Varma, "Tensile properties of peak aged 7055 aluminum alloy extrusions", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 454, p. 673, (2007).